

1. Введение. Практическая значимость

компьютерного моделирования горячих трещин

В производстве деталей ходовой части вагонов применяются литейные технологии, которые позволяют изготовить массивные детали сложной формы с развитыми внутренними полостями и способствуют формированию изотропных механических свойств. Изотропный материал литой детали обладает повышенной сопротивляемостью разрушениям при сложном объемном нагружении. Вместе с тем, отливки могут иметь сильную исходную поврежденность в виде раковин, микропор и трещин. Такие нарушения однородности, обусловленные технологическими проблемами, становятся концентраторами напряжений и способствуют в дальнейшем быстрому разрушению литой детали под действием циклического или динамического нагружения.

Одним из наиболее проблемных видов литейных дефектов для деталей, работающих под действием динамических и циклических нагрузок, являются горячие трещины на поверхности. Горячие трещины являются актуальной проблемой для малолегированных сталей.

Представляет интерес развитие расчетных методик, позволяющих выявлять возможность образования горячих трещин и корректировать технологические параметры на этапе проектирования. Такую задачу позволяет решить последовательное вычисление методом конечных элементов температурных полей и затем соответствующих напряжений при охлаждении вблизи температуры солидус.

Оправдывая репутацию динамично развивающегося предприятия, ФГУП «ПО Уралвагонзавод» активно внедряет в производство современные методы быстрого проектирования, базирующиеся на прогрессивных информационных технологиях. Так, в КБ литейной оснастки для предварительной оценки качества отливок и эффективности литниково-питающих систем используется программное обеспечение WinCast аналитического уровня, разработанное компанией RWP GmbH, Германия. Отличительной особенностью применяемого программного обеспечения является возможность рассчитывать на конечно-элементной сетке напряженно-деформированные состояния отливки или формы, а затем с учетом остаточных литейных напряжений выявлять напряжения и деформации в детали при термообработке или при эксплуатационных режимах нагружения.

2. Физические модели образования горячих трещин

Основные закономерности и причины образования горячих трещин в сталях изучены 50 лет назад [1]. В настоящее время интерес представляет количественная оценка процессов образования горячих трещин и их реализация в математические модели и затем – в инженерные программные продукты общего пользования. Для корректного использования компьютерных систем инженерного анализа при прогнозировании горячих трещин в стальных отливках требуется точное математическое моделирование процессов кристаллизации и формирования напряженно-деформированных состояний.



Внутренние напряжения, возникающие в отливке, могут быть по природе тепловыми, фазовыми или усадочными. Тепловые напряжения вызываются неравномерным распределением температуры при охлаждении. Фазовые напряжения обусловлены спецификой аллотропических превращений в твердом состоянии. Усадочные напряжения возникают из-за сопротивления более жестких стержней или формы сокращению линейных размеров при затвердевании металла. Результатом действия напряжений является коробление отливки или образование трещин. В зависимости от температурного интервала образования различают горячие и холодные трещины.

Моделирование горячих трещин с позиций механики сплошных сред. Анализируя образование горячих трещин в сплошной среде, игнорируют структурные факторы и используют для прогнозирования процессов разрушения усредненные механические характеристики металла при высоких температурах. Горячие трещины образуются при кристаллизации расплава вблизи температуры солидус, чуть выше или чуть ниже – в температурном интервале ± 50 градусов, когда прочностные и пластические свойства стали очень низки [2]. Основной причиной их образования являются усадочные напряжения, обусловленные неоднородным распределением температуры при охлаждении металла в форме [1]. Напряжения при затвердевании отливки количественно связаны с падением коэффициента линейного расширения в двухфазной зоне, величиной температурного интервала затвердевания и градиентом скоростей охлаждения, обусловленным геометрией отливки.

Существует три подхода [3] к математическому описанию трещинообразования: силовой, деформационный и энергетический. Эти подходы разработаны в рамках линейно-упругой или нелинейной упруго-пластической модели разрушения металлов и связаны с соответствующими критериями: 1) растягивающие напряжения; 2) хрупкость смеси твердого металла и жидких легкоплавких прослоек по границам; 3) энергия границ. Перечисленные критерии могут быть описаны количественно.

В условиях затрудненной усадки возникшие в отливке напряжения, достигнув значения предела прочности при текущей температуре, вызывают образование трещин. Напряжения могут быть внутренними, обусловленными собственно сокращением объема при затвердевании, и внешними, обусловленными сопротивлением стержней. Суммарные напряжения, возникшие вблизи точки солидус, либо релаксируют частично за счет пластической деформации и локального изменения формы, либо реализуются в разрушении, если пластическое течение металла затруднено. При выявлении горячих трещин предельные характеристики материалов сравниваются с расчетными параметрами при соответствующих температурах на всем заданном температурном интервале. Трещины зарождаются на поверхности в тех зонах, где расчетные напряжения превышают предел прочности при текущей температуре.

Моделирование горячих трещин с учетом структуры. Хрупкое состояние металла при высоких температурах объясняется слабыми межзеренными связями, например, из-за наличия на границах зерен жидких прослоек, представляющих собой скопления легкоплавких соединений – ликватов, включений оксосульфидов и сульфидов железа, фосфидов. Кинетика структурных изменений предполагает разделение локальных процессов разрушения на две стадии: образование зародыша трещины и развитие трещины. Горячие трещины зарождаются в высокотемпературном интервале хрупкости стали, верхняя граница которого располагается вблизи начала развития усадки. Интенсивное развитие трещин продолжается после полного затвердевания металла вплоть до температуры ниже солидус на 50-100 градусов.

Факторы, инициирующие образование горячих трещин. Горячие трещины – комплексная проблема, однако представляет интерес разделить и проанализировать



различные факторы, влияющие на их образование. Образованию горячих трещин в стальных отливках способствуют следующие факторы [4].

- Повышенное содержание серы. Сера образует с железом сульфид FeS и легкоплавкую эвтектику Fe-FeS по границам зерен, что вызывает снижение пластических характеристик стали в отливках. Образование трещин, обусловленное жидкими фазами в межзеренном пространстве, происходит ниже равновесной точки солидус, когда основная масса металла находится в твердом состоянии, но не затвердели еще легкоплавкие прослойки сульфидов на границах зерен. Объемная геометрическая модель: твердые кристаллиты и жидкие прослойки. Расплав пленок под действием возникших напряжений может течь, заполняя образовавшиеся при растяжении пустоты. Но это непродолжительный период. Далее происходит разделение твердых кристаллитов. Присутствие жидкого металла в объеме нескольких процентов усиливает этот эффект.

- Протяженный температурный интервал кристаллизации. Стали с большим интервалом кристаллизации более склонны к образованию горячих трещин, поскольку прочность и пластичность двухфазного поверхностного слоя в начальный период кристаллизации снижены. Быстро затвердевший однофазный поверхностный слой отливки обладает большей прочностью и пластичностью. С уменьшением эффективного интервала кристаллизации трещиноустойчивость сталей возрастает.

- Геометрический или размерный фактор. Когда геометрия отливки содержит сечения разной площади, в переходах от больших сечений к малым образуются концентраторы напряжений. Для сталей с протяженным интервалом кристаллизации существенным становится также размерный фактор. Трещины возникают, когда значительно различаются скорости охлаждения в разных сечениях отливки. Градиент скоростей охлаждения увеличивается в тех областях конструкции, где происходит переход от массивной части к тонким перегородкам.

- Малая теплопроводность. Низкие теплофизические характеристики стали способствуют увеличению температурного градиента по сечению отливки, и как следствие, к утолщению и упрочнению наружной корочки металла.

- Затрудненная усадка. Усадка металла в присутствии жестких и прочных стержней увеличивает уровень напряжений и способствует образованию трещин.

3. Последовательность решения расчетной задачи в интерфейсах программного комплекса WinCast

Анализ температурных полей, литейных дефектов, а также напряжений и деформаций проводится последовательно в трех функциональных модулях программного комплекса WinCast: 1) в препроцессоре генерируется конечно-элементная сетка; 2) в процессоре задаются начальные и граничные условия; задаются свойства материалов; решаются на сетке дифференциальные уравнения и вычисляются первичные узловые параметры – температуры и перемещения; 3) в постпроцессоре обрабатываются расчетные результаты, просматриваются и анализируются производные расчетные характеристики – деформация, напряжения, пространственная локализация усадочных дефектов. В САЕ-системах высокого уровня, в частности, в программе WinCast, основные модули организованы как отдельные программы. Температуры и перемещения вычисляются на одной сетке, но разными процессорами, которые организованы в виде независимых программных модулей. Сначала решается тепловая задача, и вычисляются температурные поля; затем рассчитываются тепловые напряжения.

Компьютерная разработка литейной технологии начинается с анализа геометрии отливки без литниково-питающей системы на предмет выявления тепловых узлов. При этом игнорируется заполнение формы расплавом: считается, что форма заполнена мо-



ментально. Далее, исходя из выявленных горячих зон, добавляются прибыли, и анализируется их эффективность. Рассмотрим кратко последовательность компьютерной разработки технологии на примере конкретной стальной отливки.

Шаги, выполняемые в препроцессоре ANG. Главной целью препроцессора является создание расчетной сетки. Сетка создается автоматически и может быть отредактирована вручную. Элементами сетки являются пентаэдры, ограниченные сверху и снизу треугольниками и сопрягающиеся внутри слоя плоскими четырехугольниками.

Шаг 1. Импортировать геометрическую модель. Геометрическая модель импортируется в нередактируемом формате *.stl и может быть создана в любой известной программе CAD. Отливка и все составляющие литниково-питающей системы могут быть загружены в препроцессор отдельно или одновременно. Можно сначала создать сетку для отливки с повышенной плотностью расчетных узлов, затем импортировать остальные файлы и дополнить сетку для стержней, прибылей и других вспомогательных геометрических объектов с меньшей плотностью узлов.

Шаг 2. Создать контуры сечений геометрической модели. Задается набор параллельных плоскостей с одинаковым или произвольным шагом, и в этих плоскостях препроцессор находит контуры сечений поверхностей *.stl и преобразует их в полигоны.

Шаг 3. Сгенерировать сетку в автоматическом режиме. Автоматический генератор программы WinCast ограничивает первичный куб расчетной сетки; помещает в него поверхность геометрической модели и полигоны сечений; на одном из полигонов с наиболее сложным контуром строит первый слой элементов, стараясь совместить ребра элементов с ребрами полигона; затем достраивает сетку вверх и вниз от начального слоя элементов (рис.1), изменяя при этом все три координаты узлов при аппроксимации поверхностей геометрической модели гранями элементов (рис.2).

Шаги, выполняемые в тепловом процессоре TFB. Тепловой процессор программного комплекса WinCast вычисляет температуры в расчетных узлах сетки и их изменение в заданном временном интервале.

Шаг 4. Задать разбиение временной шкалы, свойства материалов, граничные условия, характеристики заполнения формы расплавом.

Шаг 5. Произвести вычисление температурных полей.

Шаги, выполняемые в прочностном процессоре SPA.

Шаг 6. Задать нагружение. При расчете тепловых напряжений нагрузкой являются температурные поля, вычисленные на предыдущем шаге в тепловом анализе. Кроме того, нагрузками в прочностном анализе могут быть:

- 1) внешние силы и моменты сил;
- 2) поверхностное давление;
- 3) вынужденные ненулевые смещения – линейные и угловые;

Шаг 7. Задать граничные условия в виде ограничения степеней свободы.

Расчет напряжений проводится квазистатическим методом, что требует ограничения степеней свободы как минимум в трех точках сетки. Программа дает прямой доступ к ограничению перемещений узлов сетки, что позволяет избежать жесткой заделки и неадекватного уровня напряжений в зоне закрепления. Место закрепления определяется, исходя из оценки времени затвердевания и предположения, что первые затвердевшие зоны становятся жестким каркасом, на котором происходит пластическая деформация отливки при дальнейшем охлаждении.

Шаг 8. Произвести расчет напряжений и деформаций.



Шаги, выполняемые в постпроцессоре EDA. Постпроцессор позволяет анализировать и графически представлять результаты расчетов. Здесь же производится расчет таких важных параметров, как локализация трещин и усадочных дефектов.

Шаг 9. Просмотреть и проанализировать результаты расчетов.

Для анализируемой отливки выявляются две изолированные зоны (рис.3), которые необходимо подпитывать из прибылей при охлаждении. Выявленные зоны образуются в момент времени 300 секунд. В данном случае можно предложить 2 варианта конструкции – с одной прибылью по центру над ребром (рис.4) и с двумя прибылями, расположенными непосредственно над горячими зонами (рис.5).

Тепловой расчет различных вариантов расположения прибылей и отливки в форме позволяет выделить наиболее оптимальный вариант, обеспечивающий направленное затвердевание (рис.6) и отсутствие усадочных дефектов. Информацию об усадочных дефектах можно графически представить в виде изоповерхностей плотности металла (рис.7) или в шкале американского стандарта ASTM (рис.8).

4. Результаты компьютерного моделирования горячих трещин в стальных отливках

Вычисления проведены для отливки из стали 20ГЛ. Это хладостойкая сталь, которая используется для изготовления деталей, работающих в условиях низких температур (до -60°C), прежде всего – ответственных литых деталей тележек грузовых вагонов. Сталь легирована небольшим количеством марганца, что сказывается прежде всего на ее прочностных характеристиках при низких температурах, обеспечивая необходимую вязкость. Марганец специально вводится в сталь для раскисления и устранения нежелательного влияния серы. При введении марганца образуются более тугоплавкие сульфиды марганца MnS , располагающиеся внутри зерна, что повышает пластичность и трещиноустойчивость. Сталь используют в нормализованном состоянии; нормализация при 940°C приводит к образованию ферритно-перлитной структуры и гарантирует следующие механические свойства: $\sigma_{0,2} = 400 \text{ МПа}$; $\sigma_B = 500 \text{ МПа}$; $\delta = 10-15 \%$; $\psi = 20-30 \%$ [5].

В качестве предельных характеристик при оценке напряженно-деформированного состояния охлаждающихся отливок использованы экспериментальные температурно-временные зависимости прочности и пластичности, измеренные на стальных цилиндрических образцах диаметром 25 мм [6].

Сравнению трещиноустойчивости подвергнуты два варианта конструкции – с одной прибылью над центральным ребром (рис.4) и с двумя прибылями (рис.5).

В постпроцессоре визуально выводится информация о возможных зонах образования горячих трещин (рис.9). Значения шкалы отображают отношение предела прочности стали к вычисленным напряжениям с учетом температурной зависимости прочностных характеристик. Поскольку достоверные экспериментальные данные о прочности и пластичности сталей вблизи температуры солидус отсутствуют, надежно о возникновении горячих трещин можно говорить, когда это отношение составляет величину около 10. Для варианта с двумя прибылями мы прогнозируем появление трещин вблизи нижней вставки (рис.10).

Оценку возможности образования трещин можно улучшить, анализируя дополнительно напряжения и деформации, и исходя из общих принципов выявления зон разрушения: 1) если в отливке возникают тепловые или усадочные напряжения, и при этом деформация невозможна, то накопленная в металле энергия реализуется в разрушении; 2) если под действием внутренних напряжений происходит коробление, вероятность



образования трещин снижается; 3) образование горячих трещин происходит под действием растягивающих положительных напряжений.

Для оценки возможных локальных разрушений используются первые главные напряжения. Сравним напряжения для двух вариантов конструкции в момент времени 1000 секунд, когда затвердевание отливки заканчивается, и температура несколько ниже солидус. Для сравнения представим изоповерхности положительных растягивающих напряжений, превышающих в данный момент времени 20 МПа. Уровень напряжений в отливке при высоких температурах для варианта с двумя прибылями меньше; зона повышенных напряжений при высоких температурах совпадает с расчетной зоной трещинообразования вблизи нижней вставки.

5. Выводы

Компьютерный анализ усадочных дефектов и напряженно-деформированных состояний позволяет на этапе проектирования выявить и исключить те варианты литниково-питающих систем, которые не обеспечивают требуемое качество отливок.

Список литературы

- [1] W.S.Pellini. Strain theory of hot tearing. Foundry. 1952, v. 80. pp 124-199.
- [2] V.Grozdanev, V.Novosel-Radociv, R.Dmitrovic. Contribution to the research of hot tears in steel castings. AFS Trans. 1992. p265-272.
- [3] U.Chandra. Computer prediction of hot tears, hot cracks, residual stresses and distortions in precision castings: basic concepts and approach. Light Metals. 1995. pp1107-1117.
- [4] Солнцев Ю.П. Прочность и разрушение хладостойких сталей / Ю.П. Солнцев, А.В. Викулин. – М.: Металлургия, 1995. 256 с.
- [5] Солнцев Ю.П. Литейные хладостойкие стали / Ю.П. Солнцев, А.К. Андреев, Р.И. Гречин. – М.: Металлургия, 1991 – 176 с.
- [6] Козлов Л.Я. Производство стальных отливок /Козлов Л.Я., Колокольников В.М., Вдовин К.Н. и др./ Под ред. Л.Я.Козлова. – М.: «МИСИС», 2003. – 352 с.



Рисунки

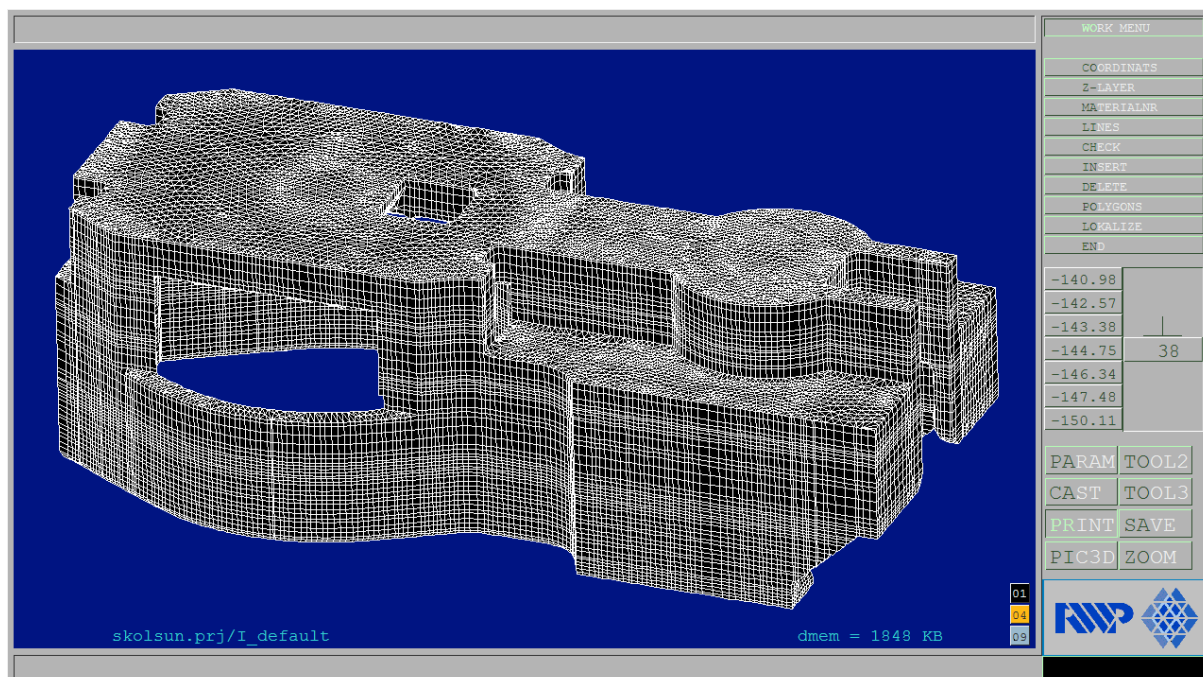


Рис.1 Расчетная сетка: изображение выведено в рабочем окне с ребрами элементов; сетка содержит 59 слоев с полигонами контуров, в каждом слое 7322 узла и 14496 треугольников; в сеточной модели отливки содержится 172214 элементов.

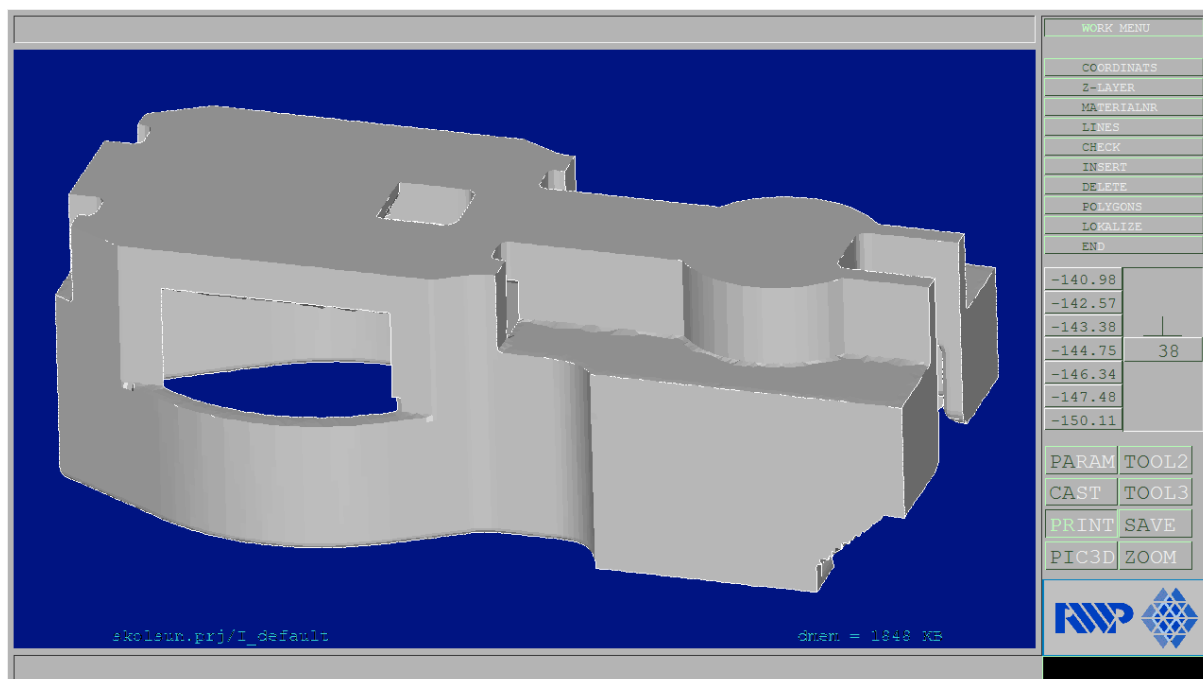


Рис.2 Расчетная сетка: изображение выведено в рабочем окне без ребер элементов; видно, что сетка способна достаточно точно описывать криволинейные поверхности.



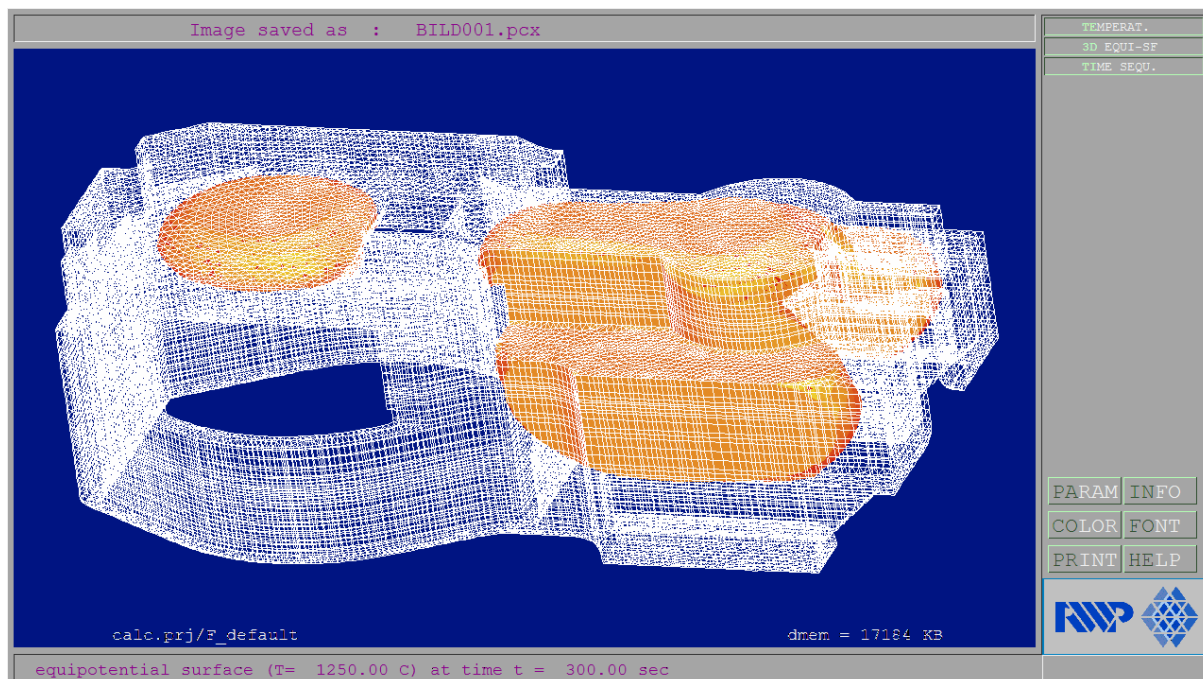


Рис.3 Тепловые узлы в отливке: для визуализации изолированные области расплава ограничены в рабочем окне изоповерхностями температуры солидус в момент времени 300 секунд.

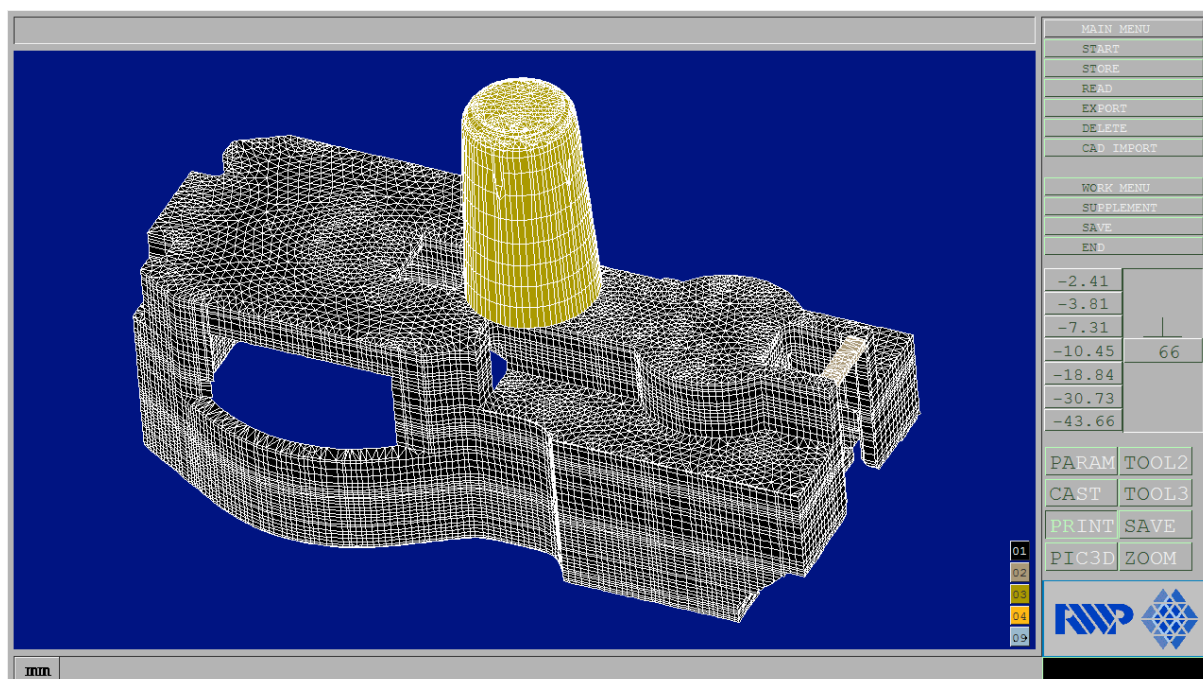


Рис.4 Вариант с одной прибылью



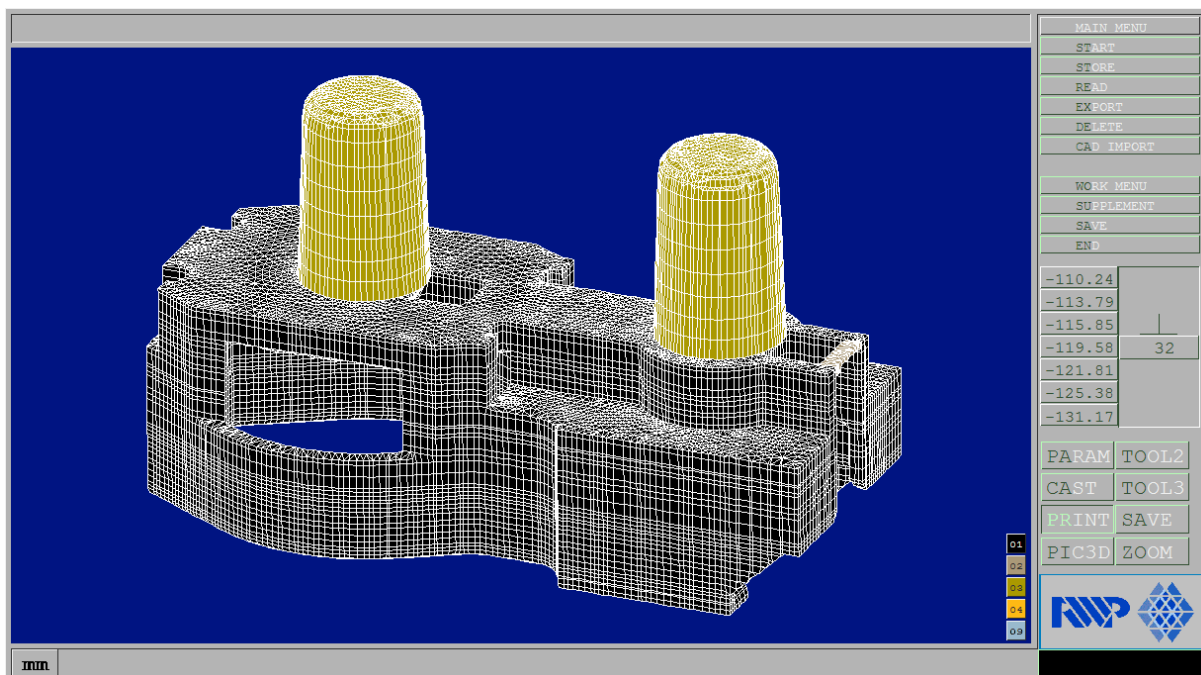


Рис.5 Вариант с двумя прибылями

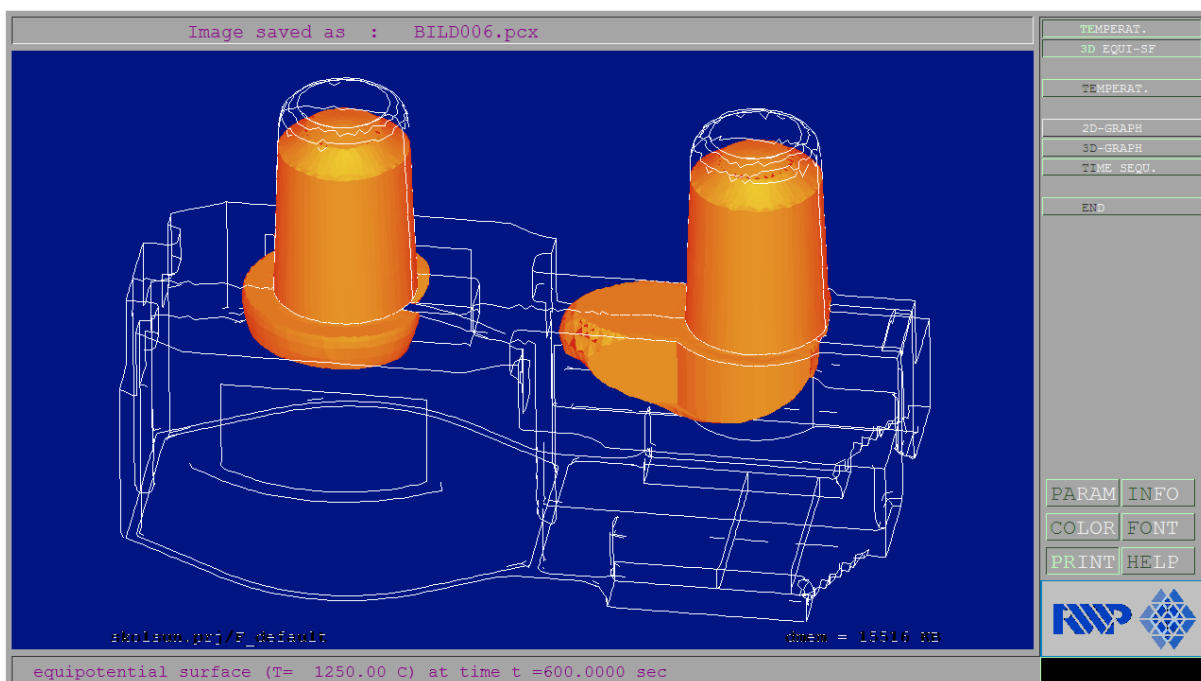


Рис.6 Эффективность работы прибылей: изолированные области расплава ограничены в рабочем окне изоповерхностями температуры солидус в момент времени 600 секунд.



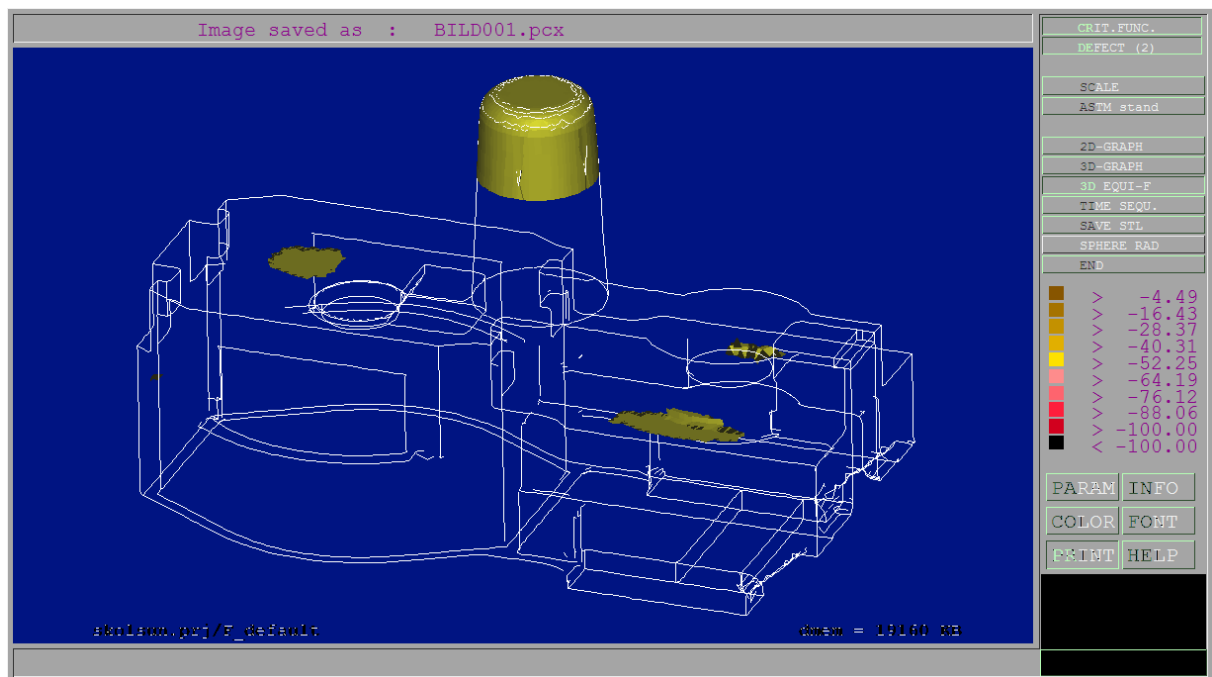


Рис.7 Усадочные дефекты: изоповерхности плотности; выделены области, в которых плотность металла снижена более, чем на 2%.

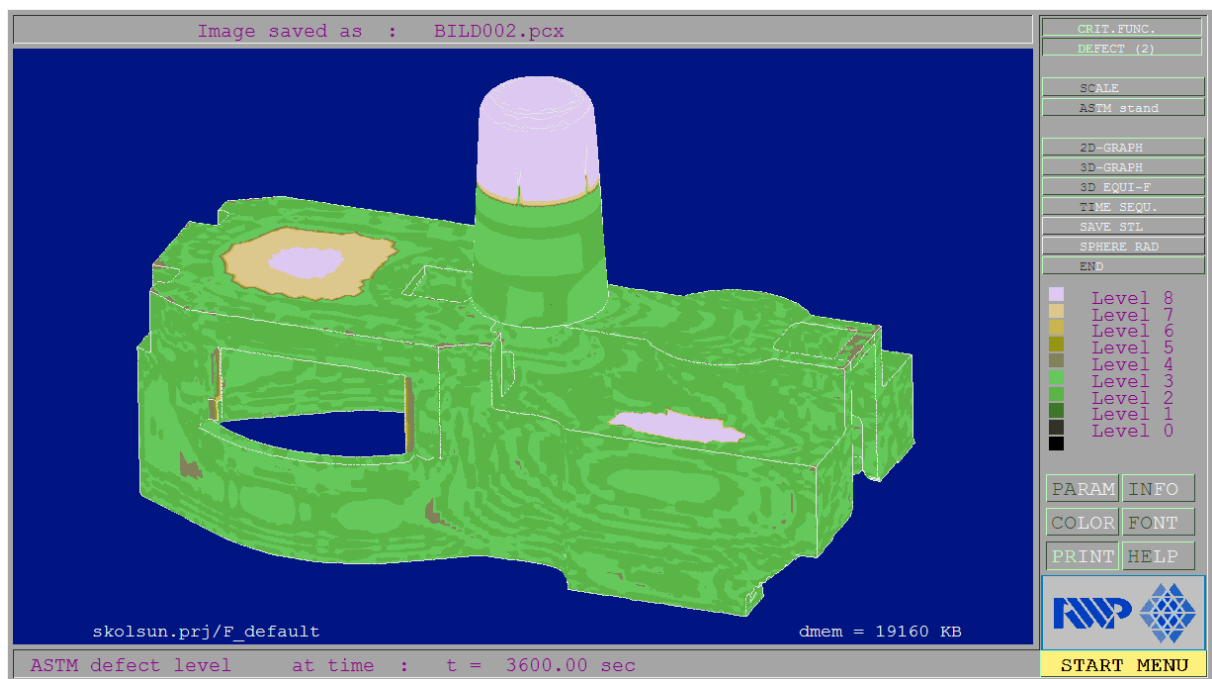


Рис.8 Усадочные дефекты: маркировка в шкале стандарта ASTM.



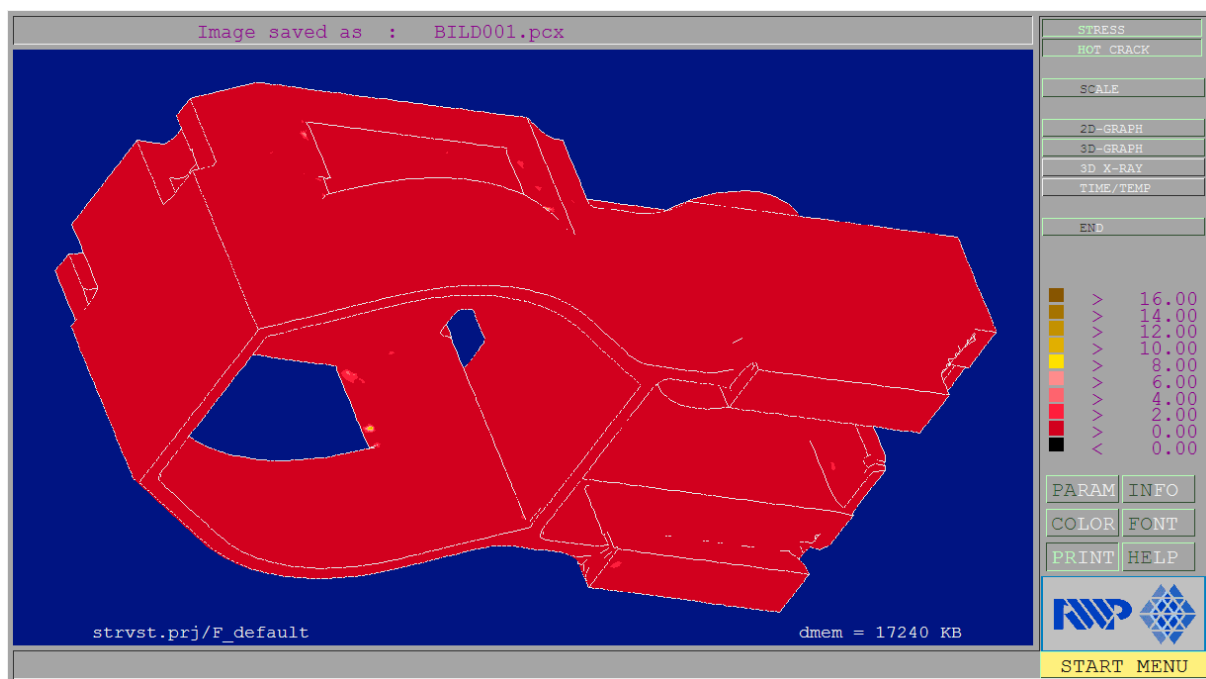


Рис.9 Отсутствие трещин для варианта с одной прибылью.

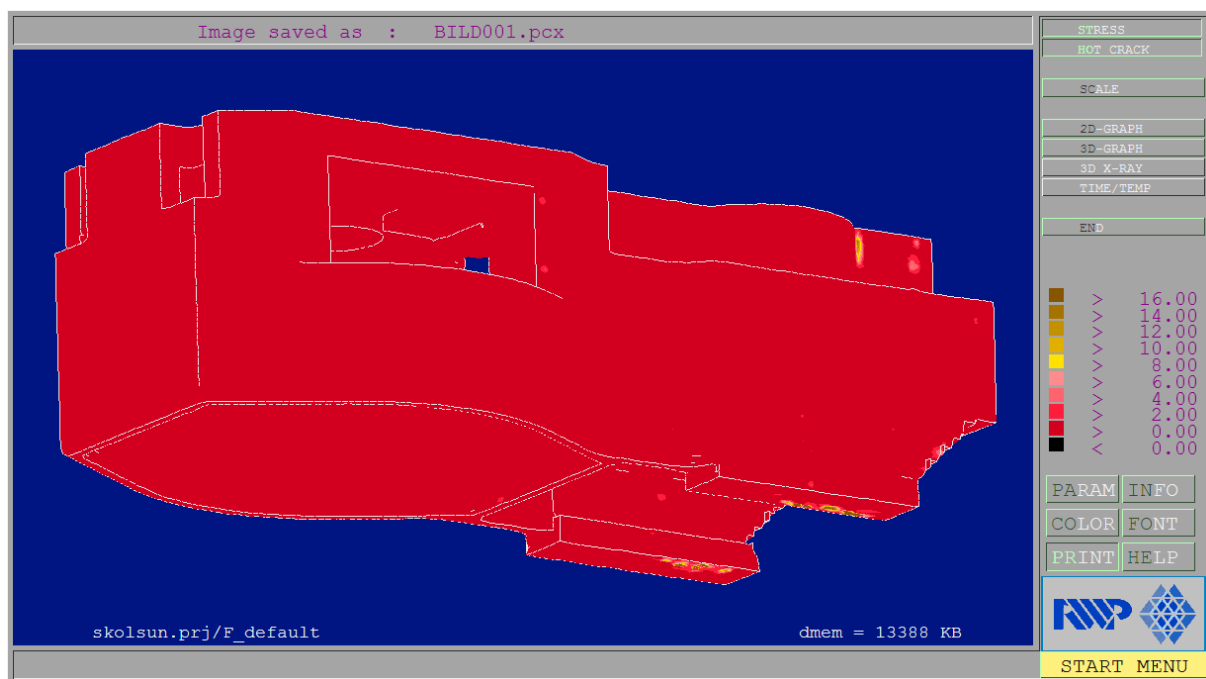


Рис.10 Зона трещин в отливке для варианта с двумя прибылями: области разрушения промаркированы желтым цветом.



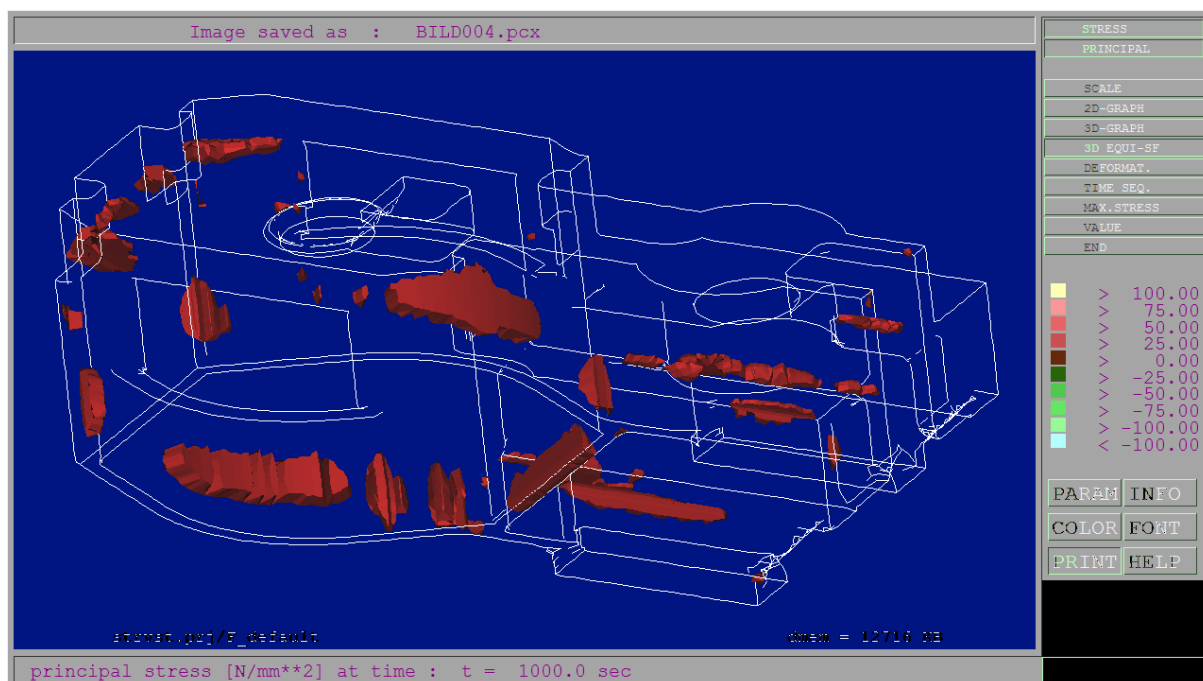


Рис.11 Напряжения вблизи температуры солидус для варианта с одной прибылью: изоповерхностями выделены зоны с напряжением выше 20 МПа.

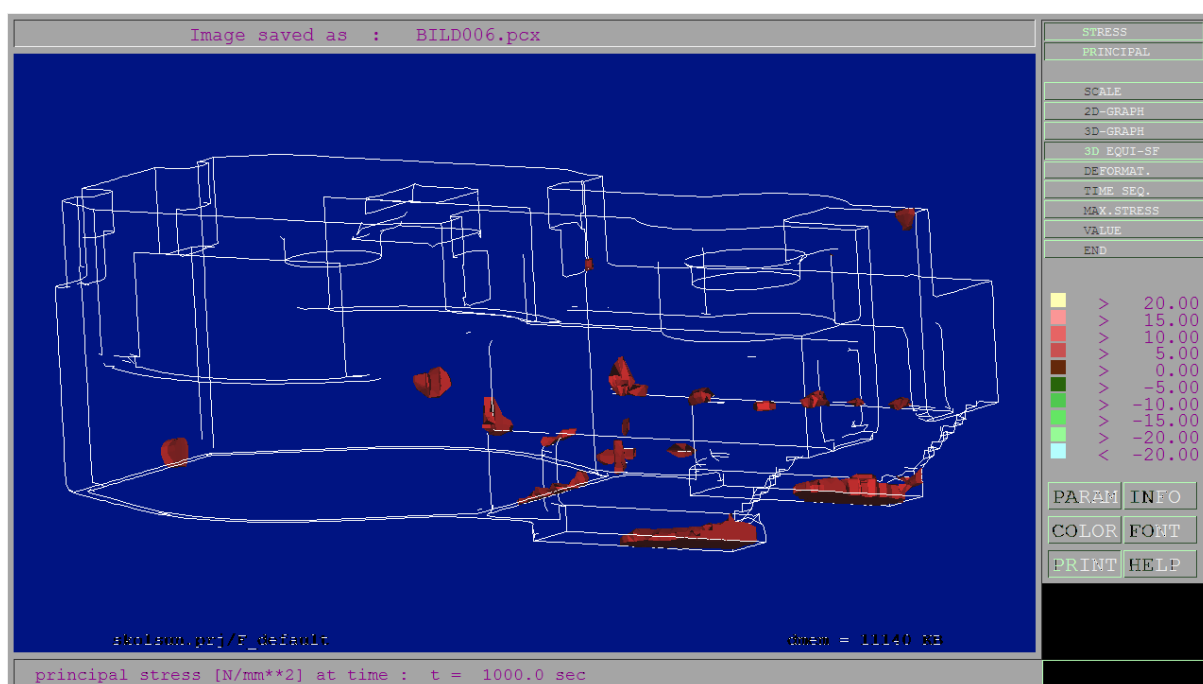


Рис.12 Напряжения вблизи температуры солидус для варианта с двумя прибылями.

